

# 反隐身与发展先进米波雷达

吴剑旗

(中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088)

**摘要:** 米波雷达具有反隐身优势,通过有效克服传统米波雷达的主要缺陷,可以大幅提高米波雷达的性能。对此提出“先进米波雷达”这种新型米波雷达的概念。首先,从频段和功率孔径积两方面优势分析了米波雷达反隐身的有效性。然后,分析了传统米波雷达的主要缺陷及其根本原因。最后,通过米波雷达发展历程的介绍,重点提出空域覆盖、测量精度、抗干扰和目标识别等是先进米波雷达要解决的主要问题,同时分别阐述了解决这些问题的基本方法。指出用先进米波雷达反隐身是经济高效的反隐身路径。

**关键词:** 先进米波雷达; 反隐身; 测量精度; 目标识别

**中图分类号:** TN958    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-2337(2015)01-0001-04

## Anti-Stealth and Development of Advanced Metric-Wave Radar

WU Jian-qi

(No. 38 Research Institute of CETC, Hefei 230088, China)

**Abstract:** Metric-wave radar has anti-stealth advantages, and its performance can be improved greatly by overcoming the major drawbacks of the traditional metric-wave radar. The concept of the advanced metric-wave radar is proposed. Firstly, the effectiveness of metric-wave radar detecting stealth targets is analyzed from its frequency band and power-aperture product advantages. Secondly, the major drawbacks of the traditional metric-wave radar and their reasons are analyzed. Lastly, the development history of the metric-wave radar is introduced and the main problems to be solved by the advanced metric-wave radar are presented, such as airspace coverage, measurement accuracy, anti-jamming, and target identification. And the basic methods to solve these problems are given respectively. The paper points out that the advanced metric-wave radar is a cost-effective way for stealth target detection.

**Key words:** advanced metric-wave radar; anti-stealth; measurement accuracy; target identification

## 0 引言

在法国召开的2014年国际雷达会议,主题是“Catch Invisible”(反隐身),从大会报告和会议文章看,本次会议介绍的反隐身手段主要是低频段雷达和双多基地雷达两大类。参加这次会议作者体会到西方雷达界已开始重视反隐身研究,对先进米波雷达的研究进展十分关注,通过了解交流,及时审视我国所走的反隐身技术路径是否正确非常必要。本文拟重点论述作者多年从事米波反隐身问题研究的见解。

过去几乎把米波雷达与简单、落后画上了等号,因为传统米波雷达不仅测量精度差、不能测

高,而且由于地面反射造成的波束上翘和波瓣分裂,导致低仰角盲区大,威力覆盖不连续。曾经雷达专家普遍认为高频段雷达才是雷达发展方向,西方国家甚至一度摒弃了米波雷达的发展。反隐身的需求给米波雷达发展带来了新的契机。米波雷达除了在频段上具有反隐身的优势外,可相对廉价获得大功率孔径积的优势也十分明显。如果能将上述传统米波雷达的主要缺陷克服的话,米波雷达就可以成为骨干反隐身装备,也就是说可以找到一条代价不高的有效的反隐身技术路径。

然而传统米波雷达的缺陷长期存在,相关的认识也根深蒂固,比如说到米波雷达测高,以前很多雷达专家的观点是米波雷达受地面反射影响,波瓣变形严重,不可能精确测高;又比如,超分辨

技术长期未在雷达中得到成功应用,因为雷达界普遍认为超分辨算法要求的信噪比高,雷达中满足不了其需要的高信噪比;再比如,传统思维认为米波雷达波瓣上翘,低仰角性能肯定不好,因此只能作中高空雷达,不能指望米波雷达有良好的低空性能,等等。要想克服米波雷达的缺陷,首先要敢于打破传统思维的束缚,要通过创新寻求突破。

多年的研究实践表明,传统米波雷达的缺陷是可以被克服的。采用有源相控阵列体制,应用现代信号处理方法,能克服传统米波雷达主要缺陷,大幅提高米波雷达性能的新型米波雷达,我们称作“先进米波雷达”。

## 1 米波雷达的反隐身优势

第一部雷达是在二战中诞生的,此后雷达经历了从低频段向高频段的发展,因为越高频段越容易获得高的测量精度,过去雷达专家普遍认为高频段雷达才是雷达发展方向,西方雷达界甚至在相当长的时期内摒弃了米波雷达的发展。隐身目标的出现给雷达技术的发展提出了严峻挑战。1989 年美军对巴拿马行动首次使用隐身飞机 F-117A,随后在 1991 年海湾战争中,将隐身与精确打击相结合,奠定了现代空中力量的基调。隐身性能作为首要特征的四代战机 F22、F35 批量装备,以及各型隐身轰炸机、隐身无人机的大量出现,使传统雷达网的能力几乎被清零。与三代战机相比,四代隐身战机的 RCS 在微波频段下降了 2~3 个数量级。

根据监视雷达方程:

$$R_{\max}^4 = P_{\text{av}} A_e \sigma E_i(n) F^4 t_s / (4\pi k T_0 F_n (S/N)_1 L_s \Omega) \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  为雷达散射截面(RCS)。在  $\sigma$  下降 2~3 个数量级的条件下,若工作频率和其他条件不变,要获得同样的作用距离,需要相应增大雷达的功率孔径积  $P_{\text{av}} A_e$  2~3 个数量级。相应雷达的成本大约要增加多少呢?为了直观且便于比较,我们假定雷达天线为平面阵列天线,矩形口径,接收与发射共口径且单元数相等,若要增大功率孔径积 200 倍,可以得出雷达单元数需增加 14 倍。考虑到阵列雷达单元数量对整机成本构成影响的比例关系,可以得出结论,雷达整机成本将上升一个数量级。使用成本中,仅耗电一项,也将上升一个数量级。如果完全采用增大功率孔径积的方式

来反隐身,整个雷达网的更新连同日常运行费用,将是一笔巨大的财政负担。

由于电磁波的瑞利和谐振散射模式对飞机外形不敏感,吸波涂层吸收电磁波效果受到厚度与波长关系的限制,采用米波长甚至更长波长的低频段来反隐身是最直接、高效的措施。经过大量的计算、仿真和测试分析,国际上比较公认的是,隐身飞机的 RCS 在米波段要比微波段大 2~3 个数量级,我们称之为米波雷达反隐身的频段优势。除此之外,与微波雷达相比,米波雷达还具有非常大的功率孔径积优势。为了能说清楚这个问题,我们来作个比较,把工作频率为 300 MHz 的米波雷达与工作频率为 3 000 MHz 的 S 波段微波雷达进行比较,看看在成本相当的情况下,这两部雷达的功率孔径积有多大差异。为简单起见,假定天线口径为矩形口径,雷达都是平面阵列的有源相控阵体制,这种情况下雷达的单元数(通道数)决定着雷达的复杂度,也极大程度地决定着雷达的成本,大型相控阵雷达的有源阵面和复杂程度与其单元数紧密相关的处理设备,如相应的 AD 变换、数据传输与处理等设备,往往要占雷达总成本的 80% 以上,我们就按 80% 进行测算。我们可以得出,在相同成本情况下,米波雷达的天线面积是微波雷达的 80 倍。接下来我们考虑有效辐射功率的因素,根据使用的固态功率管统计数据,米波段末级功率管的单位辐射功率的成本约占 S 波段的 1/4,整个发射通道的单位辐射功率的成本至多占 S 波段的 1/3。也就是说,在成本相同的情况下,米波雷达比 S 波段微波雷达的功率孔径积要大 240 倍,达到了 2 个数量级。对于反隐身飞机来说,加上前面所说的反隐身频段优势,整体达到了 4 个数量级以上。不但可以抵消隐身飞机 RCS 减小 3 个数量级的影响,还能进一步增大探测距离近一倍,用以抵消四代机等先进隐身战机超音速巡航压缩预警时间的影响。

此外,米波雷达还具有几乎不受云雨杂波干扰,地、海杂波干扰强度相对微波雷达弱,多普勒模糊度低,具有抗反辐射导弹优势等。

## 2 米波雷达的主要缺陷

是不是简单地用米波雷达替代微波雷达就可以解决反隐身问题了呢?问题却不那么简单,传

统米波雷达存在不能准确测高、威力覆盖不连续、低角盲区大、阵地适应性差等严重缺陷,这也正是多数西方国家长期放弃米波雷达发展的原因,如果克服不了这些缺陷,米波雷达就只能作为补充手段,无法作为骨干装备使用。反之,如果把这些缺陷都克服了,米波雷达能像微波雷达一样具有高的测量精度、可以适应高山阵地等各种地形环境、有良好的低空覆盖性能,等等,那么米波雷达才能作为防空网骨干雷达,担当起反隐身的大任。

造成米波雷达不同于微波雷达的这些缺陷的根本原因是什么呢?在微波频段,地球表面粗糙度引起的漫反射作用较强、表面植被的吸收率高,因此反射系数小,加上微波频段天线波束窄,可以利用天线的方向选择性进一步抑制多径信号,因此多数情况下多径影响不十分严重。而在米波频段地球表面反射系数非常大,接近于1,多径分量与直达分量可以比拟,而米波天线在俯仰上波束比较宽,无法通过天线的方向选择性来抑制多径信号,因此在各种地形环境下多路径影响都非常严重。多径信号与直达信号具有强相干性,某些角度上的相干叠加干涉,会显著增大作用距离,同时在另外一些角度上的相消干涉则会大幅减小作用距离,造成空域覆盖的不连续。更为不利的是,相消干涉会使低仰角覆盖性能严重变差。多径干涉同时破坏了天线的波瓣结构,通常的比幅/比相测角法都会失效,因此无法进行目标高度的测量。

此外,米波频段中及邻近频段拥挤着大量电视、调频广播等民用服务,通过天线进入雷达的外部噪声电平比微波频段高。雷达频谱宽度窄,通常目标分辨能力弱。天线波瓣宽、不易实现低副瓣,抗干扰能力弱等。

### 3 发展先进米波雷达

从20世纪30年代至今,米波雷达经历了轮回式的发展历程。从诞生到早期的繁荣,到逐步走向衰落,之后又再度崛起。俄罗斯(前苏联)就是活生生的样本,上世纪50年代和60年代期间,前苏联研发部署了大量米波雷达,但在上世纪70年代,特别是80年代,这些雷达大部分被更精确、性能更高的S波段雷达所取代,许多陈旧的米波雷达系统被销售或赠送给了第三世界国家。但是20世纪末科索沃战争爆发,F-117A隐身飞机被萨姆

导弹击落,据信是P18型米波雷达对发现跟踪目标起到了关键性作用,此后俄罗斯用固态技术和数字处理技术改造米波雷达的业务激增<sup>[1-2]</sup>。近期米波雷达得到重新关注和发展被认为是一次重大技术反转。

在米波雷达的家族中,绝大多数型号是两坐标雷达和机械扫描雷达。至今未见西方国家有开发和列装米波三坐标雷达的报道。俄罗斯最著名的米波三坐标雷达是“天空”UE,它是由一个水平天线和一个测高天线组合而成,水平天线负责搜索发现目标,测量目标的方位和距离,测高天线负责测量高度,类似配高制。由于它采用的是两个扇形波束而不是笔形波束来实现三坐标测量,严格地说,它不是真正意义的现代三坐标雷达体制,因而传统米波雷达的缺陷依然存在。“天空”家族的米波三坐标雷达后续型号主要有“天空”SVU、“天空”M RLM-ME和“天空”UME,这些型号都采用了有源相控阵体制。根据2013年10月简氏的报道,诺夫哥罗德无线电工程研究所(NNIIRT)已开发出一种新型双波段三坐标预警雷达,命名为“天空”UME,它采用米波波段进行距离测量,L波段进行高度测量<sup>[3-5]</sup>。由此可以推测,俄罗斯米波三坐标雷达的最新型号虽然采用了有源相控阵体制,但米波频段测高问题并未完全解决好,仍然需要其他辅助测高手段。

先进米波雷达要解决的主要问题,首先是空域覆盖问题,即由于地面(水面)反射造成的波瓣上翘和波瓣分裂问题,波瓣上翘会导致低仰角(低空)覆盖性能恶化,波瓣分裂则会导致空域覆盖不连续。在两维有源相控阵体制下,在俯仰上采用独立波束设计,结合地形匹配进行波束指向和形状优化,可有效改善空域覆盖性能。运用认知雷达的概念和方法,进行收发方向图的自适应联合优化,能获得更好的效果,也更方便实际应用。

第二个要解决的是提高测量精度的问题,这其中最核心的是如何提高测高精度。由于存在严重的多路径干扰,仅靠增大垂直维天线尺寸是不能彻底解决问题的,实际情况常常也不允许过大的垂直天线口径。实践证明,MIMO(多输入多输出)雷达体制是克服多径影响的一种选择,米波稀布阵综合脉冲孔径雷达是一种多频MIMO雷达,不仅有效提高了测高精度,同时还获得了非常高

的方位分辨率和方位测量精度。MIMO 雷达需要通过长时间积累来弥补发射增益的损失,并不能适用于所有应用场合。我们针对不同地形条件的大量研究和试验,成功探索出了一条将超分辨技术用于解决米波雷达低仰角测高问题的路子,同样得到了非常好的结果。也就是说,经过多年的研究实践,我们已找到了多种有效解决米波雷达测高问题的方法<sup>[6-7]</sup>。

再者,就是抗干扰问题。米波雷达的抗干扰有着其特殊性,频带拥挤、电磁环境干扰严重,在低频段还有强的天空噪声干扰。在接收链路中采用预选滤波、抗混叠窄带滤波器组、高性能数字滤波多种手段复合设计,可有效抑制电磁环境干扰。工作频率在 100 MHz 以下时,天空噪声的影响比较严重,主要来自银河和太阳噪声,具有明显的方向性,可以用空域滤波的方法进行抑制。关于抗敌对干扰,要从降低截获概率、空域滤波和干扰剔除三个方面采取综合对抗措施。低副瓣波束捷变扫描、掩护脉冲、低脉冲功率波形等是有效的抗截获手段,用大动态、多自由度自适应副瓣对消对抗强噪声类干扰,用副瓣匿隐、干扰识别与剔除对抗脉冲类干扰,还可以用多帧数据相关、速度位置等多参量相关滤波等方法,进一步消除干扰。

还有一个非常重要的问题,就是目标识别。米波频段绝对带宽窄,绝大部分宽带识别方法不适用,因此米波雷达主要应采用窄带识别方法。利用目标运动特性和波形调制、谐振、极化等特征量,有很多方法可以对目标进行分类和机型识别,试验表明可以获得很高的识别概率。

## 4 结束语

传统米波雷达的缺陷长期存在,一度被认为是一种性能较差的雷达,即只能用于警戒,不能担任引导任务,这样也限制了米波雷达的发展。随着反隐身技术的不断深入发展,米波雷达的反隐身优势给其发展带来了新的契机。

本文在介绍米波雷达发展历程的基础上,提出先进米波雷达要解决的主要问题包括空域覆盖、测量精度、抗干扰和目标识别等。通过多年研究实践,本文认为采用有源相控阵列体制,应用现

代信号处理方法、高性能计算和天线阵列技术等有关新型雷达技术,可以有效克服传统米波雷达存在的不能准确测高、威力覆盖不连续、低角盲区大、阵地适应性差等主要缺陷。

解决了上述问题的米波雷达,不但性能优异,而且采购和使用性价比高,这正是先进米波雷达的真正内涵。用先进米波雷达反隐身是适合我国国情的经济高效的反隐身路径。

## 参考文献:

- [1] CHERNYAK V S, IMMOREEV I Ya. A Brief History of Radar in the Soviet Union and Russia[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2009, 24(9):B1-B32.
- [2] KOPP C. Russian VHF Counter Stealth Radars Proliferate[J]. Defense Today, 2008(4):32-36.
- [3] KOPP C. NNIIRT 1L119 Nebo SVU/RLM-M Nebo M Assessing Russia's First Mobile VHF AESAs[R/OL]. [2014-5-21]. <http://www. ausairpower. net/ APA-Nebo-SVU-Analysis. html>.
- [4] KOPP C. Advances in Russian and Chinese Active Electronically Steered Arrays(AESAs)[C]//2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology, Waltham, MA:IEEE, 2013:29-42.
- [5] GYÜRÖSI M. NNIIRT Develops New Dual-Frequency Early Warning Radar[EB/OL]. [2013-10-15]. <http://www. janes. com/article/28401/nniirt-develops-new-dual-frequency-early-warning-radar>.
- [6] CHEN Bai-xiao, WU Jian-qi. Synthetic Impulse and Aperture Radar (SIAR): A Novel Multi-Frequency MIMO Radar[M]. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte Ltd, 2014.
- [7] WU Jian-qi, XU Jin. Some Issues in the Development of Metric Surveillance Radar[C]//2013 International Conference on Radar, Adelaide, SA: IEEE, 2013: 6-10.

## 作者简介:



吴剑旗 男,1966年生,四川泸州人,研究员,主要研究方向为雷达系统、先进米波雷达、反隐身。

E-mail: wujianqi38@163.com